

# **Simulationsgestützter Kraneinsatzplaner für Hochbauprojekte**

## ***Simulation-based crane operations planner for building construction projects***

Habeb Astour, Volkhard Franz, Universität Kassel, Kassel (Germany),  
h.astour@uni-kassel.de, vfranz@uni-kassel.de

**Abstract:** As part of the research work of the department of construction management at Kassel University, in the area of simulation of construction processes, a reference model for the simulation of building construction processes was implemented. For which an adequate consideration of the spatial and temporal boundary considerations takes place. The reason for this was the development of a process modeling method that allows a simple parameterization of the simulation model based on CAD data. Building site facilities, which have an appropriate functionality target for construction and include all production, transportation, storage and other items that are needed for a building project has not yet been considered in detail in the previous implementation. This article presents an extended reference model with which the logistic processes of the crane operation can be practicably mapped in practice.

## **1 Einleitung**

Die Planung einer Baustelleneinrichtung als ein Bindeglied zwischen der Planung und der Realisierung von Hochbauprojekten hat zur Aufgabe, für einen möglichst optimalen Materialfluss und für einen effektiven Einsatz von kostenintensiven Maschinen zu sorgen (Bauer 2007).

Dabei stellen bei Hochbauprojekten Turmdrehkrane das Hauptfördermittel baustelleninterner Materialtransporte dar, wobei sie nicht nur Materialien vom LKW zum Lagerplatz und zur Einbaustelle transportieren, sondern auch für die Montage von z. B. Schalung und Fertigteilenelementen eingesetzt werden. Für den wirtschaftlichen Erfolg einer Baumaßnahme ist es daher für das Bauunternehmen u. a. von großer Bedeutung, den Kraneinsatz auf der Baustelle so detailliert wie möglich zu planen. Im Rahmen dieses Beitrags wird ein simulationsgestützter Kraneinsatzplaner vorgestellt, der alle maßgebenden Faktoren während der Ausführungsphase berücksichtigt.

## 2 Simulationsgestützter Kraneinsatzplaner

Die dieser Forschungsarbeit zu Grunde liegende Literaturrecherche hat ergeben, dass bisher noch kein durchgängiges und praxistaugliches System zur Planung und Optimierung des Kraneinsatzes existiert. Die bisherigen Forschungsarbeiten zur rechnergestützten Optimierung des Kraneinsatzes befassen sich vornehmlich mit der Lösung von Teilaspekten (Kath 2005, Bindick 2006, Günthner et al. 2010, Irzarry und Karan 2012 etc.). In ihnen wurden weder die Bauzeit, die Warte- und Betriebszeiten, die Kranbewegungsregeln (wie z. B. Vorfahrtsregeln beim Mehrkranbetrieb) noch andere Sicherheitsmaßnahmen einbezogen, welche beim Kranbetrieb in Form einer Kranbetriebsanweisung gegeben sind. Eine Berücksichtigung der Positionierung und Dimensionierung von Turmdrehkränen, unter Beachtung aller auf der Baustelle einfließenden Faktoren und deren Wechselwirkungen während der Ausführungsphase, wird ebenfalls nicht von ihnen behandelt.

Max und König (2010) haben ein Konzept zur Modellierung und Analyse typischer räumlicher Interaktionen von Baukränen beim Mehrkranbetrieb während des Transports und Einbaus von Betonfertigteilen vorgestellt. In diesem Beitrag wird jedoch die Möglichkeit des Überschwenkens mit und ohne Last der oberen sich bewegenden Krane über die niedrigeren nicht betrachtet. Darüber hinaus finden auch die Vorfahrtsregeln der sich gleichzeitig bewegenden Krane keine hinreichende Berücksichtigung.

Um einen praxistauglichen Kraneinsatzplaner zu implementieren, muss zunächst das Simulationsmodell in der Lage sein, das richtige Verhalten der Turmdrehkrane bzw. deren Führer unter Berücksichtigung der einzuhaltenden Sicherheitsvorschriften zu erfassen. Hierfür wurde im Zuge der Forschungsarbeit ein Kranverhaltensmodell innerhalb des Simulationsmodells entwickelt und implementiert, das das Verhalten von Kranführer und Antikollisionsmaßnahmen simuliert. Darüber hinaus ist dieses Modell bei einem Mehrkranbetrieb im Stande, den Informationsfluss zwischen den Kränen in Echtzeit während des Simulationslaufs realitätsnah abzubilden.

## 3 Das Kranverhaltensmodell

Die Abbildung 1 zeigt das UML-Aktivitätsdiagramm der Turmdrehkrane in dem entwickelten Simulationsmodell. Dieses Diagramm repräsentiert das Kranverhaltensmodell und lehnt sich an das von Kugler (2012) entwickelte Simulationsmodell an.

Die Krane warten zuerst auf die von ihnen zu erfüllenden Aufträge. Sie erhalten diese Aufträge als Anfragen von den entsprechenden Arbeitsgruppen. Hat mindestens ein Kran einen Auftrag, werden innerhalb der Aktivität (Untermmodell) *Krane ohne Auftrag* die Sicherheitsmaßnahmen ergriffen, die dazu dienen, die Kollision zwischen den zu bewegenden und nicht zu bewegenden Kränen zu vermeiden. Innerhalb der Aktivität (Untermmodell) *Quelle ansteuern* bewegen sich die beauftragten Krane zur Materialquelle. Dort werden zudem die Sicherheitsmaßnahmen ergriffen, die zur Vermeidung von Kollisionen der sich bewegenden Krane miteinander notwendig sind. Hat ein Kran die Materialquelle erreicht, kann er die Materialien aufnehmen. Nach der Materialaufnahme bewegt sich gegebenenfalls ein Kran zur Materialsenke, d.h. zu den Bauabschnitten bzw. zu

den entsprechenden Bauteilen, wo die Materialien entladen werden. Dieser Prozess wird wiederholt bis der Kran seinen Auftrag erledigt hat. Danach wartet der Kran bzw. warten die Krane erneut auf neue Aufträge.

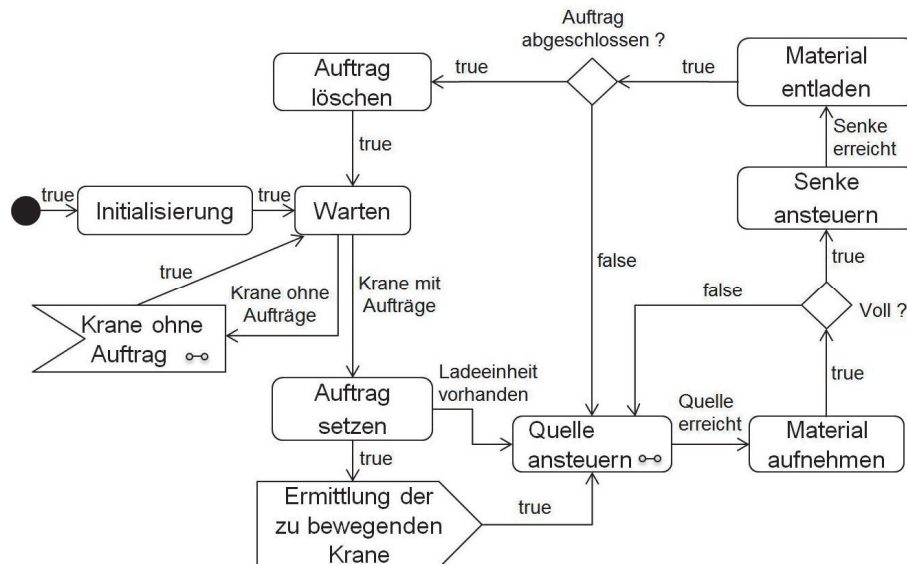


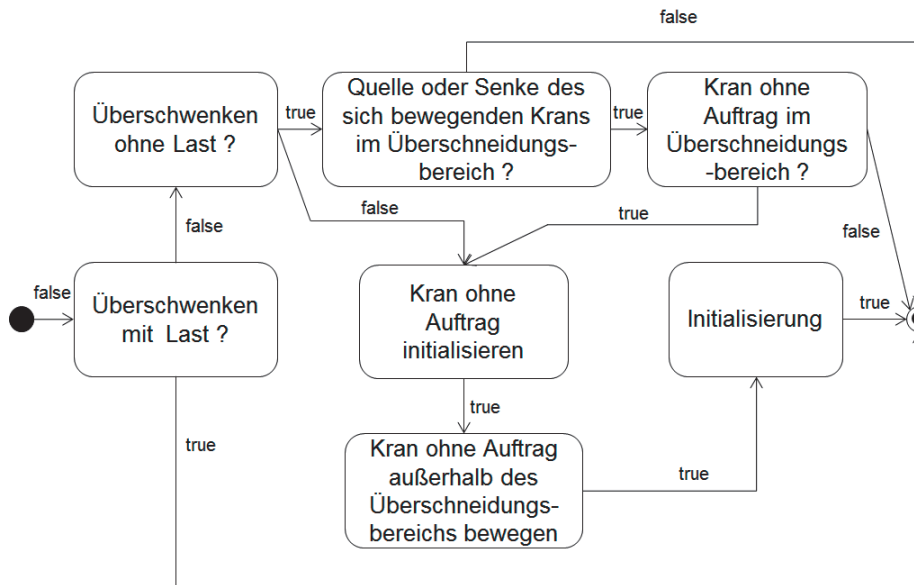
Abbildung 1: UML Aktivitätsdiagramm der Turmdrehkrane

Im Folgenden werden die beiden Untermodelle *Kran ohne Auftrag* und *Quelle ansteuern* beschrieben.

### 3.1 Untermodell *Kran ohne Auftrag* des Kranverhaltensmodells

Die Kollisionsgefahr kann erst bestehen, wenn mindestens ein Kran sich bewegen muss. In diesem Fall müssen sich auch die Krane ohne Aufträge bewegen, die sich in dem Arbeitsbereich des sich bewegenden Krans befinden. Mit dem Arbeitsbereich ist der Bereich gemeint, in dem sich der Kran während der Durchführung seines Auftrags bewegt. Die Zustandsdaten aller Krane ohne Aufträge werden nun erfasst und mit den Zustandsdaten der sich bewegenden Krane verglichen. Die Zustandsdaten umfassen die Positionen der Systemelemente (Kran, Kranbauteile, Gebäude und Hindernisse auf der Baustelle) und die Bewegungsregeln der Krane. Diese Daten werden aus der CAD-/BIM-Umgebung, aus der SQL-Datenbank und aus der Simulationsumgebung während der Simulationsläufe ausgelesen.

Der Vergleich erfolgt entsprechend dem Untermodell *Kran ohne Auftrag* des Kranverhaltensmodells (Abb. 2).



**Abbildung 2:** Untermodell Kran ohne Auftrag des Kranverhaltensmodells

Der Kran ohne Auftrag wird sich nicht bewegen, wenn obere sich bewegende Krane ihn mit Last überschwenken dürfen und er untere sich bewegende Krane überschwenken (ohne oder mit Last) darf. Der Kran ohne Auftrag wird sich auch nicht bewegen, falls der Arbeitsbereich des sich bewegenden Krans nicht in seinem Überschneidungsbereich mit dem Kran ohne Auftrag ist oder falls der Ausleger des Krans ohne Auftrag außerhalb von seinem Überschneidungsbereich mit dem sich bewegenden Kran ist. Der Überschneidungsbereich ist der Bereich auf der Baustelle, in dem mehr als ein Kran arbeiten kann. Der Überschneidungsbereich entsteht, wenn der Abstand zwischen zwei Kranen weniger als die Summe der Auslegerlängen dieser Krane beträgt.

Außer den beiden obengenannten Fällen muss sich der Kran ohne Auftrag außerhalb der entsprechenden Überschneidungsbereiche bewegen.

Der Kran hat bei seiner Bewegung bzw. Drehung zwei Alternativen:

- Drehen im Uhrzeigersinn (der negative Drehsinn) oder
- Drehen gegen den Uhrzeigersinn (der positive Drehsinn)

Bei der Auswahl der Drehrichtung wird der Drehsinn genommen, mit dem der Kran schneller den sicheren Bereich außerhalb der gefährlichen Überschneidungsbereiche erreichen kann.

In Abbildung 3 wird die positive Drehrichtung ausgewählt, da in dieser Richtung der sichere Bereich schneller erreicht werden kann.

Beim Erreichen des sicheren Bereichs wird der Kran ohne Auftrag zurückgesetzt, um wieder den Ausgangszustand als Kran ohne Auftrag, aber in einer neuen Position zu erhalten.

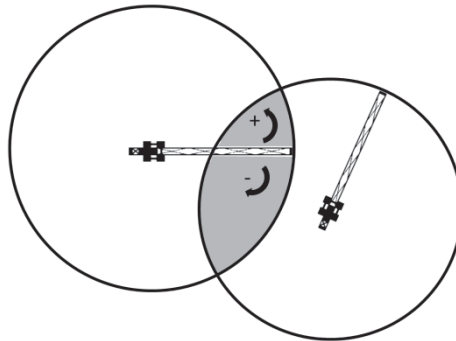


Abbildung 3: Auswahl der Krandrehrichtung

### 3.2 Untermodell Quelle ansteuern des Kranverhaltensmodells

Nach der geeigneten Bewegung aller Krane ohne Aufträge anhand der oben beschriebenen Vorgehensweise können sich nun die zu bewegenden Krane bewegen. Falls die Anzahl der sich bewegenden Krane 1 ist, besteht in dem System nunmehr keine Kollisionsgefahr und dieser Kran kann sich störungsfrei bewegen (Abb. 4).

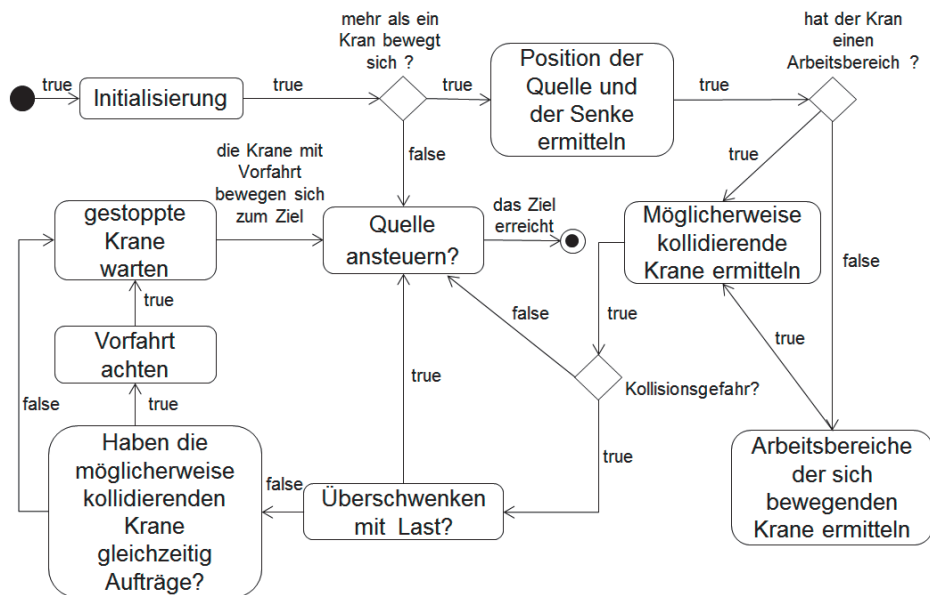


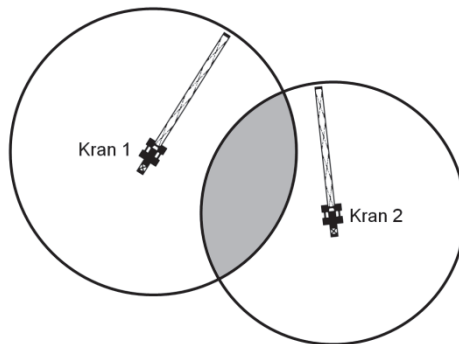
Abbildung 4: Untermodell Quelle ansteuern des Betriebsmittelagenten

Ist aber die Anzahl der sich bewegenden Krane mehr als 1, werden die Zustandsdaten dieser Krane paarweise miteinander verglichen. Haben aber die sich bewegenden Krane keine gemeinsamen Überschneidungsbereiche, können sich die Krane kollisionsfrei bewegen. Die Kollisionsgefahr zwischen den sich bewegenden Kranen kann entstehen, wenn sie einen gemeinsamen Überschneidungsbereich

haben und beide Krane diesen bei ihren Bewegungen überschwenken. Wenn hingegen nur einer von den sich bewegenden Krane den Überschneidungsbereich überschwenkt, sind die Bewegungen der Krane auch kollisionsfrei.

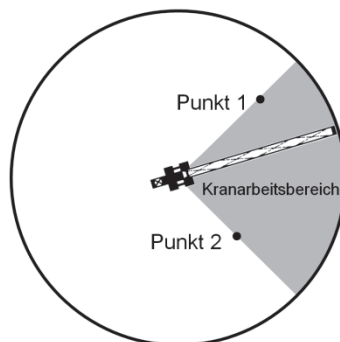
Die Kollisionsgefahr zwischen zwei sich bewegenden Kranen (z. B. Kran 1 und Kran 2) (Abb. 5), die einen gemeinsamen Überschneidungsbereich haben, besteht nur, wenn mindestens eine der folgenden Bedingungen erfüllt ist:

- Die Materialquellen von Kran 1 und Kran 2 sind in deren Überschneidungsbereich.
- Die Materialquelle von Kran 1 und die Senke von Kran 2 sind in deren Überschneidungsbereich.
- Die Senke von Kran 1 und die Materialquelle von Kran 2 sind in deren Überschneidungsbereich.
- Die Senken von Kran 1 und Kran 2 sind in deren Überschneidungsbereich.



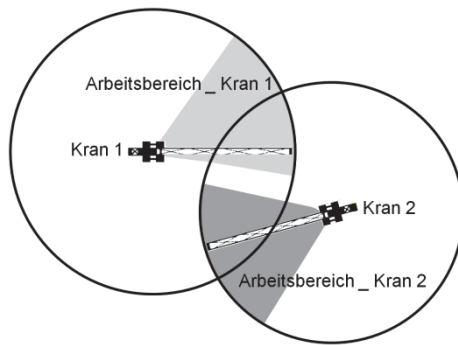
**Abbildung 5:** Zwei sich bewegende Krane mit einem Überschneidungsbereich

Ist mindestens eine der obengenannten Bedingungen erfüllt, werden die Arbeitsbereiche der betroffenen Krane ermittelt. Der Arbeitsbereich wird mithilfe der Punkte (Punkt 1, Punkt 2) ermittelt, zwischen denen der Kran die Materialien transportiert (Abb. 6).



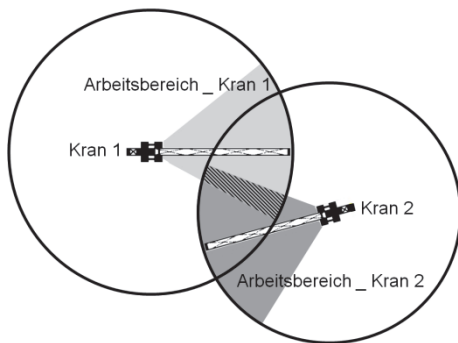
**Abbildung 6:** Die Ermittlung des Arbeitsbereichs eines Krans

Die Erfüllung einer oder mehrerer von den obengenannten Bedingungen bedeutet aber nicht unbedingt eine Krankollision. Das bedeutet nur, dass die Arbeitsbereiche der Systemkrane (oder Teile davon) den Überschneidungsbereich überlappen. Die Abbildung 7 zeigt zwei Krane deren Arbeitsbereiche teilweise in dem Überschneidungsbereich liegen, deren Arbeitsbereiche sich aber nicht überlappen. In diesem Fall können sich die beiden Krane kollisionsfrei bewegen.



**Abbildung 7:** Nicht überlappende Arbeitsbereiche

Die Abbildung 8 zeigt den Fall, bei dem zwei Arbeitsbereiche sich überlappen. Die schraffierte Fläche repräsentiert den Bereich, in dem die Krane möglicherweise kollidieren werden.



**Abbildung 8:** Überlappende Arbeitsbereiche

Bei den überlappenden Arbeitsbereichen der sich gleichzeitig bewegenden Krane erreicht das System den kritischen Punkt. Daher wird eine Reihe von Sicherheitsüberprüfungen durchgeführt, bevor diese Krane sich bewegen dürfen.

Zuerst werden die möglicherweise kollidierenden Krane in Form einer zweiseitigen Tabelle aufgelistet (Tab. 1).

**Tabelle 1:** Auflistung von möglicherweise kollidierenden Kranen am Beispiel von drei Kranen

Spalte 1	Spalte 2
Kran 1	Kran 2
Kran 1	Kran 3
Kran 2	Kran 3

Jede Zeile in dieser Tabelle repräsentiert ein Paar von Kranen, die möglicherweise miteinander kollidieren könnten.

Anschließend werden diese Krane zeilenweise nach den Bewegungssicherheitsregeln überprüft, die in der externen SQL-Datenbank gespeichert sind, damit Kollisionen vermieden werden können. Falls einer der beiden Krane in einer Zeile den anderen Kran in der gleichen Zeile mit Last überschwenken darf, wird dieses Paar als kollisionsfreies Paar bezeichnet. Dieser Vorgang wird für jede Zeile der obigen Tabelle wiederholt. Als Ergebnis werden sich die Krane bewegen, die sich kollisionsfrei bewegen können. Die anderen Krane müssen noch paarweise überprüft werden. Für jedes Paar werden die beiden Krane gefragt, ob sie gleichzeitig deren Aufträge bekommen haben. Falls nicht, wird sich der Kran bewegen, der zuerst den Auftrag bekommen hat. Der andere Kran in dem entsprechenden Paar muss vorübergehend gestoppt werden. Haben aber die beiden Krane deren Aufträge gleichzeitig erhalten, wird sich der Kran bewegen, der die Vorfahrt hat. Der andere Kran in diesem Paar wird temporär gestoppt. Die gestoppten Krane müssen bis zu dem Zeitpunkt warten, in dem das System seinen Zustand ändert und sie wieder die Möglichkeit haben, sich unter Berücksichtigung der Bewegungsregeln zu bewegen und ihre Transportaufträge zu erledigen.

Die Entscheidung, welche Krane sich bewegen dürfen und welche gestoppt werden müssen, hängt sehr stark davon ab, welcher Kran bzw. welche Krane die Transportaufträge haben, welche die Priorität nach der Reihenfolge der Bauprozesse besitzen. Deshalb werden manchmal die Krane gestoppt, die Aufträge mit weniger Priorität haben.

## 4 Grafische Überwachung

Mit Hilfe des in der Simulationsumgebung eingebetteten Visualisierungswerkzeuges wird eine Animation der Draufsicht von der Baustelle mit allen vorhandenen Elementen generiert, die es dem Anwender ermöglicht, den Bewegungsablauf der Krane zu verfolgen (Abb. 9). Dadurch wird ein schneller und einfacher Überblick über die gesamte Funktionsweise der Krane und deren mögliches Kollisionsverhalten gegeben. Anschließend wird der Auslastungsgrad der verwendeten Krane errechnet.

Durch die Änderung der Dimensionen und/oder Positionen der verwendeten Krane bzw. durch die Änderung der Kranbewegungsregeln ändern sich der Auslastungsgrad der Krane sowie möglicherweise die Gesamtbauzeit. Anhand mehrerer Simulationsläufe können letztlich die passenden Krandimensionen, -positionen und -bewegungsregeln unter Berücksichtigung der entsprechenden



Auslastung der Arbeitsgruppen, die von den verwendeten Kranen bedient werden, festgelegt werden.

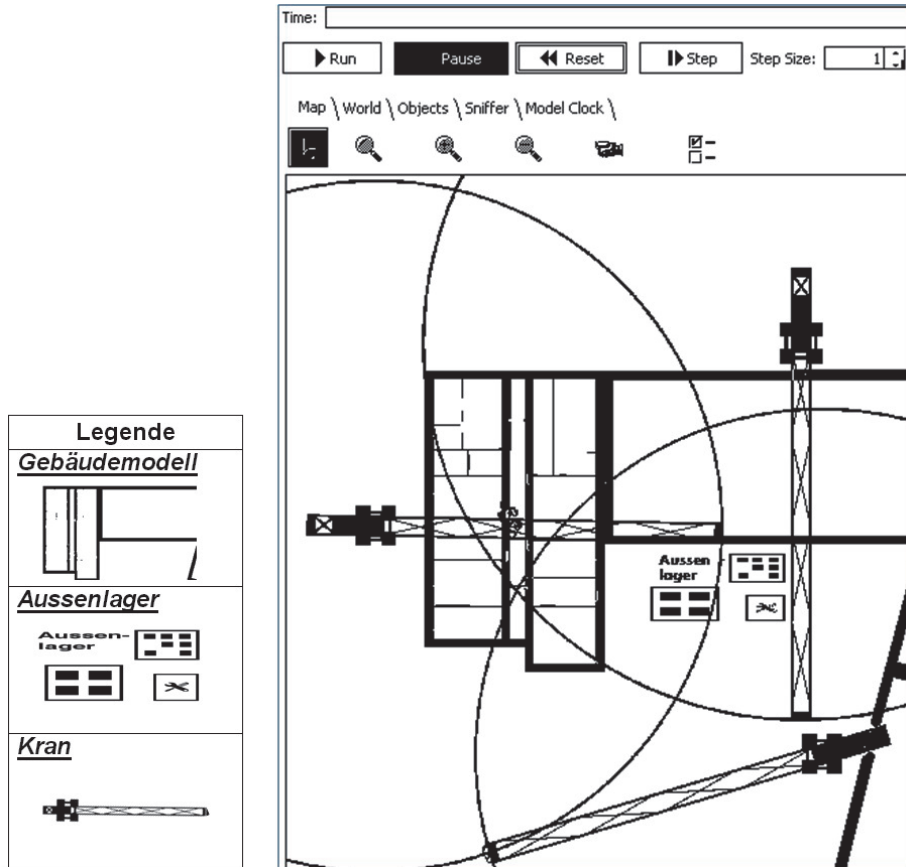


Abbildung 9: Das Visualisierungswerkzeug der Simulationsumgebung

## 5 Fazit und Ausblick

Mit dem vorgestellten simulationsgestützten Kraneinsatzplaner ist es möglich, das Kranverhalten in Abhängigkeit der sich verändernden Baustellenparameter über die ganze Ausführungszeit zu betrachten und, sofern erforderlich, Änderungen an der Dimensionierung und/oder Positionierung des Krans bzw. der Krane vorzunehmen. Da die Gebäudedaten aus den CAD-/BIM-Dokumenten automatisch entnommen werden und für die Kraneinsatzplanung der Anwender nur noch wenige Angaben mit Hilfe von Eingabemasken vornehmen muss, können ohne großen Mehraufwand mehrere Simulationsläufe mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt werden.

Die zukünftige Arbeit wird sich zum einen auf die Positionierung und Dimensionierung der anderen Baustellenelemente wie z. B. Lagerflächen, Werkplätze und Bearbeitungsflächen sowie Sozial- und Büroeinrichtungen und zum anderen auf die Validierung des Kraneinsatzplaners konzentrieren.

## Literatur

- Bauer, H.: Baubetrieb. Berlin, Heidelberg: Springer 2007.
- Bindick, S.: Ein Prototyp zur rechnergestützten Kraneinsatzplanung mit dem Autodesk Architectural Desktop 2005. Studienarbeit Technische Universität Braunschweig, Institut für Computeranwendungen im Bauingenieurwesen, 2006.
- Günthner, W. A.; Kessler, S.; Horenburg, T.; Frenz, T.: 4D-Einsatzplanung von Turmdrehkränen. BauPortal 7 (2010), S. 393-395.
- Irzarry, J.; Karan, I.: Optimizing location of tower cranes on construction sites through GIS and BIM integration. Journal of Information Technology in Construction 17 (2012), S. 351-366.
- Kath, T.: Sicher arbeiten mit Kränen durch Simulation und Visualisierung. In: Bargstädt, H. (Hrsg.): Sicherheit auf Baustellen. Bauhaus-Universität Weimar 2005, S. 29-34.
- Kugler, M.: CAD-integrierte Modellierung von agentenbasierten Simulationsmodellen für die Bauablaufsimulation im Hochbau. Kassel: kassel university press 2012.
- Marx, A.; König, M.: Simulation von Bauprozessen unter Berücksichtigung zeitvarianter räumlicher Restriktionen. In: Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.): Integrationspakete der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 133-140.